

УДК 681.787:535.4

DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-12-69-76

## ЗАПИСЬ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

*А.А. Жээнбеков*

*Аннотация.* Приведено описание метода записи голограмм, соответствующих различным состояниям объекта, и последующее получение путем их попарного интерферометрического сравнения в зависимости от перемещений, колебаний и деформаций. Показано преимущество применения метода цифровой голографической интерферометрии для восстановления комплексной амплитуды изображения Фурье объекта с использованием голограмм сфокусированных изображений, поскольку голограмма сфокусированного изображения формируется на ПЗС-матрице как результат интерференции между опорным и объектным пучками. Описаны математические выражения интенсивности, зарегистрированные на ПЗС-матрице. Продемонстрирован интерфейс программы цифровой голографической интерферометрии для обработки и расчета интерферограмм для синтеза, фильтрации и количественной обработки Фурье-голограмм.

*Ключевые слова:* цифровая голографическая интерферометрия; ПЗС-матрица; регистрация голограмм; Фурье преобразование; программный продукт обработки и расчета интерферограмм.

---

## САНАРИПТИК ГОЛОГРАФИЯЛЫК ИНТЕРФЕРОМЕТРДИ КОЛДОНУУ МЕНЕН СҮРӨТТӨРДҮ ЖАЗУУ ЖАНА ИШТЕТҮҮ

*А.А. Жээнбеков*

*Аннотация.* Санариптик голография методун практикалык колдонууда, аны голограммаларды жазуу процесси ишке ашырылат, жогорку чечилүүчү санариптик жазуу түзүлүштөрүн аспаптарын колдонуу менен санариптик голограммаларды компьютердик иштетүүдөн кийин санариптик голографиялык интерферометрияны термелүүчү процесстерде, техникалык диагностикада ж. б. бузбай туруп контролдоо ыкмасында күчтүү курал катары санариптик голографиялык интерферометрияны колдонуунун жаңы мүмкүнчүлүктөрүн алдын ала аныктайт. Бул изилдөөдө объекттин ар кандай абалына туура келген бир голограммалардын сериясын жазуу ыкмасы жана андан кийин жылышууларга, термелүүлөргө жана деформацияларга кабылган абалда, аларды жуп интерферометриялык салыштыруу жолу менен алуу баяндалган. Фокусталган сүрөттөрдүн голограммаларын колдонуу менен объекттин Фурье сүрөтүнүн комплекстүү амплитудасын калыбына келтирүү үчүн санариптик голографиялык интерферометрия ыкмасын колдонуунун артыкчылыгы көрсөтүлгөн. ПЗС матрицасында катталган интенсивдүүлүктүн математикалык туюнтмалары сүрөттөлөт. Фурье-голограммаларды сандык иштетүү үчүн интерферограммаларды иштетүү, синтездөө жана эсептөө үчүн санариптик голографиялык интерферометрия программасынын интерфейси көрсөтүлдү.

*Түйүндүү сөздөр:* санариптик голографиялык интерферометрия; ПЗС-матрицасы; голограммаларды каттоо; Фурье трансформациясы; интерферограмманы иштетүү жана эсептөө программалык продуктусу.

---

## IMAGE RECORDING AND PROCESSING USING A DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETER

*A.A. Zheebekov*

*Abstract.* The practical use of the digital holography method, which implements the process of recording holograms using high-resolution digital recording devices with subsequent computer processing of digital holograms, has predetermined new possibilities for using digital holographic interferometry as a powerful tool for non-destructive testing, in oscillatory processes, technical diagnostics, etc. This study describes a method for recording holograms

corresponding to different states of an object, and then obtaining them by pairwise interferometric comparison depending on displacements, vibrations and deformations. The advantage of using the digital holographic interferometry method to restore the complex amplitude of the Fourier image of an object using holograms of focused images is shown, since a hologram of a focused image is formed on a CCD matrix as a result of interference between the reference and object beams. The mathematical expressions of intensity registered on the CCD matrix are described. The interface of the digital holographic interferometry program for processing and calculating interferograms for synthesis and quantitative processing of Fourier holograms is demonstrated.

**Keywords:** digital holographic interferometry; CCD matrix; hologram registration; Fourier transform; software product for processing and calculating interferograms.

**Введение.** Основным предметом голографической интерферометрии является получение и интерпретация интерференционных картин, которые появляются, когда сохраненные на голограмме когерентные волны в дальнейшем восстанавливаются и интерферируют с волной сравнения. Сохранение и последующее восстановление когерентных волн, диффузно отраженных или рассеянных объектами голографирования, позволяет интерферометрически сравнивать эти объекты в различных состояниях.

Идеи для восстановления голографически записанной информации с использованием компьютерной обработки, были предложены Дж. Гудменом, Р. Лоуренсом [1], а также Р.В. Кронродом и др. [2, 3].

Цифровая голографическая интерферометрия является логическим развитием аналоговой голографической интерферометрии и имеет ряд принципиальных преимуществ, расширяющих границы её практического применения.

В цифровой голографии анализ и синтез волновых фронтов осуществляется посредством их компьютерной обработки, которая позволяет регистрировать голограммы непосредственно на матричный цифровой сенсор – ПЗС-матрицу или КМОП-матрицу, и обрабатывать записанную картину распределения интенсивности цифровыми методами [4].

Анализ волновых фронтов, зарегистрированных цифровым регистрирующим устройством, осуществляется без использования физической реконструкции и может быть использован для сравнения двух и более волновых фронтов, записанных в разные моменты времени. То есть фактически реализуется интерферометрический метод – цифровая голографическая интерферометрия [5–8].

Процесс численного преобразования цифровой голограммы может быть реализован посредством применения одним из типов дискретного дифракционного преобразования: Френеля–Кирхгофа, Френеля или Фурье. Практика показывает, что наиболее быстрым и легко реализуемым является алгоритм быстрого преобразования Фурье, который проще использовать в практике цифровой голографии. Поэтому схемы записи цифровых голограмм должны быть построены таким образом, чтобы для восстановления комплексной амплитуды изображения объекта использовалось Фурье-преобразование.

**Метод исследования.** Для восстановления комплексной амплитуды изображения объекта Фурье-преобразованием, наиболее технологичным, с точки зрения анализа диффузно-отражающих объектов, является цифровая голографическая интерферометрия с использованием голограмм сфокусированных изображений (рисунок 1) [9–10]. На плоскость матрицы фокусируется уменьшенное или увеличенное изображение объекта в зависимости от его реальных размеров и опорного пучка света.

Излучение лазера делится на объектный и опорный пучок, непосредственно поступающий на приемный сенсор ПЗС видеокамеры. Объектный пучок освещает объект в направлении  $k_i$ . Часть света, отраженная объектом в направлении  $k_v$ , проходит через оптическую фокусирующую систему и формирует на приемном сенсоре ПЗС камеры изображение объекта. Голограмма сфокусированного изображения формируется на ПЗС-матрице цифровой камеры как результат интерференции между опорным и объектным пучками. При этом суперпозиция опорного и предметного пучков на приемной ПЗС-матрице камеры осуществляется с помощью светоделителя BS, который устанавливается так, чтобы опорный пучок исходил в направлении сенсора камеры из мнимого источника, расположенного вблизи апертуры D. Размер апертуры подбирается исходя из критерия Найквиста [11], в соответствии с которым на каждый период интерференционной картины должны приходиться не менее двух отсчетов, т. е. светочувствительных ячеек оцифрованного изображения.

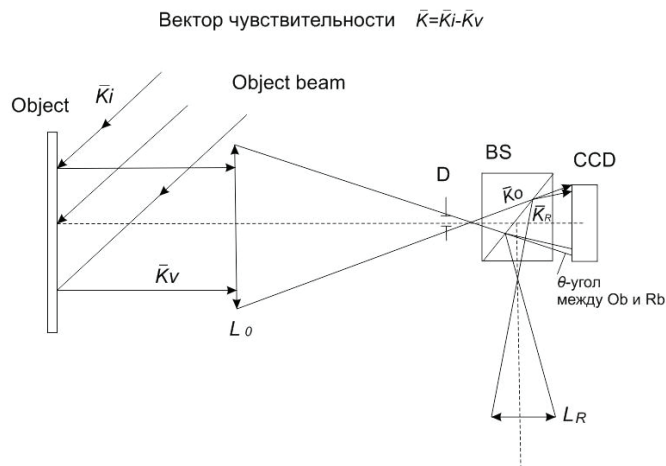


Рисунок 1 – Оптическая схема записи цифровой голограммы сфокусированного изображения

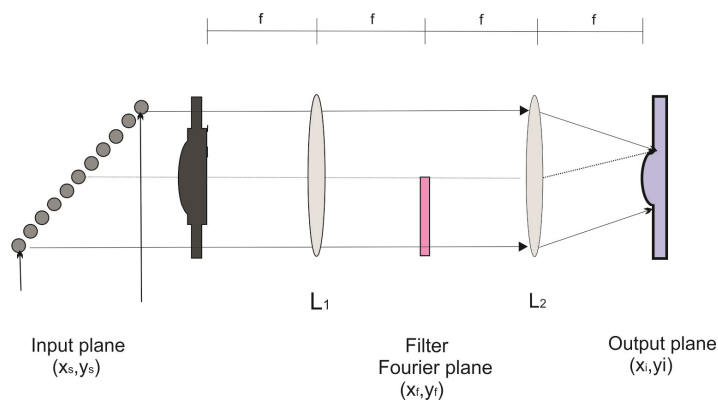


Рисунок 2 – Цифровое восстановление голограммы с использованием компонентов из двух линз

Изменение угла схождения опорного и объектного пучков осуществляется регулированием на малые углы наклона светоделителя. Размеры спеклов в плоскости изображения регулируются путем подбора диафрагмы (D). Наиболее эффективной является несимметричная щелевая апертура с размерами  $a \times b$ . Она позволяет получать в плоскости изображения несимметричные спеклы. Эти спеклы имеют большие размеры в направлении, перпендикулярном несущим полосам (малый размер  $a$ ). В то же время подбором величины  $b$  регулируют размер спекла вдоль направления несущих полос так, чтобы он был больше размера приемного пикселя.

Записанная по схеме рисунка 1, цифровая голограмма представляет собой трехмерный массив данных  $A \times B \times C$ , где  $A \times B$  – размер приемного сенсора в пикселях;  $C$  – индекс дискретизации данных каждого пикселя. Для восстановления изображения объекта используется компьютерная симуляция сходящегося опорного пучка или осуществляется выбор соответствующей линзы, разделяющей изображения в фокальной плоскости (рисунок 2).

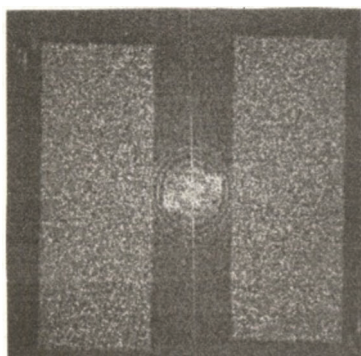


Рисунок 3 – Фурье-массив

Для восстановления объектной волны необходимо дважды применить двумерное Фурье-преобразование к зарегистрированному массиву. При первом применении Фурье-преобразования на экране компьютера наблюдается Фурье-массив (рисунок 3), в котором присутствуют три компонента: суперпозиция двух полей в центре, а также объектное поле и его комплексно-сопряженное поле, ограниченные изображением диафрагмы.

Для того чтобы восстановить объектную волну, необходимо второй раз применить Фурье-преобразование по границам одного из изображений диафрагмы или по выбранной площадке, находящейся внутри изображения диафрагмы.

Пусть  $R(x,y)$  – опорная волна, а  $U(x,y)$  – объектная волна, исходящая от объекта. Тогда интенсивность, зарегистрированная на ПЗС-матрице, описывается выражением (1) [12]:

$$I_H(x,y) = |R_H(x,y)|^2 + |U_H(x,y)|^2 + R_H(x,y)U_H^*(x,y) + R_H^*(x,y)U_H(x,y), \quad (1)$$

где  $H$  – индекс, обозначающий плоскость голограммы, а индекс  $*$  – комплексное сопряжение.

Интенсивность, описываемая уравнением (1) регистрируется на двумерное электронное устройство (матрицу), состоящее из рядов чувствительных ячеек-пикселей ( $M \times N$  ячеек), имеющих размеры  $\Delta x \times \Delta y$ , что позволяет записать значение интенсивности в виде функции  $I_H(m\Delta x, n\Delta y)$ , где  $m$  и  $n$  – целые числа. Последние два члена уравнения (1) содержат информацию об амплитуде и фазе объектной волны. Эта информация может быть выделена с помощью пространственной фильтрации с использованием метода преобразования Фурье [13]. То есть, применяя к зарегистрированному массиву преобразование Фурье, можно выделить и отфильтровать один из двух последних членов уравнения (1). Оба этих члена разделяются в Фурье-плоскости в результате небольшого наклона опорного пучка по отношению к объектному. Из полученной в цифровом виде комплексной амплитуды  $U_H(m\Delta x, n\Delta y)$  может быть рассчитана локальная фаза волнового фронта объектной волны в диапазоне  $0 \div 2\pi$ :

$$\Psi_{Hw}(m\Delta x, n\Delta y) = \arctg \frac{I_m[U_H(m\Delta x, n\Delta y)]}{R_e[U_H(m\Delta x, n\Delta y)]}, \quad (2)$$

где  $R_e$  и  $I_m$  – действительная и мнимая часть комплексного числа, соответственно.

Значения фазы, полученной по этой формуле, соответствуют разрывной функции с областью изменения в пределах интервала  $[-\pi, \pi]$ . Для восстановления непрерывной развернутой картины значений фазы применяется алгоритм развертывания фазы или устранения разрывов.

Путем вычитания значений фаз объектного поля, рассчитанных для двух состояний объекта, можно получить значение абсолютной разности фаз, и восстанавливается объемная картина попиксельного

изменения фазы  $\Delta\Psi$ , которая позволяет рассчитать смещение точек объекта  $u$  в направлении вектора чувствительности интерферометра  $s$  по формуле:

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} us, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения лазера;  $s$  – вектор чувствительности интерферометра, определяемый выражением:

$$s = k_i - k_v,$$

где  $k_i$  и  $k_v$  – единичные векторы освещения и наблюдения, соответственно.

Из выражения (3) следует, что максимальная чувствительность цифрового голографического интерферометра к перемещениям достигается при совпадающих направлениях освещения и наблюдения ( $s = 2$ ). При этом каждая полоса на интерферограмме имеет цену  $\lambda/2$ . При длине волны используемого лазера  $\lambda = 0,532$  мкм, базовая чувствительность интерферометра составляет 0,266 мкм на одну полосу. В случае, если перемещения поверхности не превышают величины  $\lambda/2$ , полосы на интерферограмме не образуются. Но, несмотря на это, распределение фаз в объектных волнах для двух голограмм и их разность могут быть также определены и рассчитаны по информации, содержащейся в отдельных пикселях ПЗС-матрицы.

В случаях, когда все точки поверхности смещаются в одном направлении, при этом направление известно, то для измерения полного вектора перемещений достаточно при построении оптической схемы обеспечить совпадение векторов  $u$  и  $s$ .

При изучении сложных колебательных процессов объекта, когда направление вектора  $u$  изменяется от точки к точке, невозможно обеспечить совпадение направления векторов  $u$  и  $s$  одновременно для всех точек поверхности. В этом случае для расчета полного вектора перемещений необходимо произвести измерение проекций полного вектора перемещений в каждой точке на оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , для чего нужно получить как минимум три линейно независимых уравнения вида (3). Простейшим способом решения задачи является регистрация для каждого состояния объекта трех голограмм при различных направлениях векторов освещения, не лежащих в одной плоскости, и неизменном направлении вектора наблюдения. Это позволяет получить три линейно-независимых уравнения вида (3) и рассчитать проекции полного вектора на оси координат.

При реализации метода цифровой голографической интерферометрии существенным фактором, сдерживающим его широкое использование, является значительно меньшая разрешающая способность матричных приемников по сравнению с фотопластинками для записи голограмм.

Расстояние между центрами пикселей  $\Delta x$  матричных сенсоров составляет порядка 3 мкм, что соответствует разрешающей способности  $R = 1/\Delta x = 330$  лин/мм, а фотопластинки для голографии имеют разрешение  $R \geq 3000$  лин/мм.

Для обеспечения возможности регистрации голограммы при столь низкой разрешающей способности, необходимо существенно уменьшить пространственную частоту ( $f_{np}$ ) интерференционной структуры, возникающей в области наложения объектной и опорной волн. Необходимость в снижении пространственной частоты вытекает из теоремы Котельникова–Шенона [14], которая требует, чтобы интервал дискретизации  $\Delta x$  был меньше, чем  $f_{np}/2$ .

Минимальное значение этого интервала зависит от расстояния между центрами соседних пикселей используемой цифровой приемной светочувствительной матрицы. Так, при расстоянии между центрами соседних пикселей  $\Delta x$ ,  $f_{max} = 1/\Delta x$ , а значит,  $f_{np} \leq f_{max}/2$  или  $\xi \geq 2\Delta x$ , где  $\xi$  – период полос голограммы.

Период высокочастотных полос голограммы определяется двумя факторами: углом между осями предметной и опорной волн  $\theta$  (рисунок 1) и длиной волны  $\lambda$ . При  $\sin \theta \leq \lambda_0/2\Delta x$ , тогда при длине волны, например,  $\lambda = 0,532$  мкм, угол  $\theta$  при  $\Delta x \approx 3$  мкм, имеем:  $\theta \leq 6^\circ$ .

Таким образом, выполнение условия теоремы Котельникова наиболее просто достигается уменьшением угла схождения опорного и объектного пучков. Учитывая мировой опыт, наиболее эффективной является схема интерферометра, типа представленной на рисунке 1.

**Расчет и обработка интерферограмм.** Разработан программный продукт на языке Matlab для ввода, предварительной обработки голограмм и расчета интерферограмм.

Пакет включает два модуля:

1. Модуль ввода цифровых голограмм. Модуль включает программу захвата кадров цифровой камеры и обеспечивает ввод и запоминание голографических изображений, поступающих от цифровой камеры интерферометра.

2. Модуль реконструкции голограмм и расчета интерферограмм обеспечивает выполнение следующих функций:

- двойное комплексное Фурье-преобразование первичных голограмм (массива чисел – голограммы  $G_1$  и  $G_2$ ) с целью фильтрации несущей пространственной частоты. Пространственная фильтрация позволяет выделить в Фурье-плоскости область пространственных частот, несущих информацию об объектной волне, и устранить сопряженные частоты и шумы, связанные с рассеянием лазерного излучения в оптическом тракте интерферометра;
- восстановление распределения фазы в плоскости голограмм из комплексного массива.

Эта программа содержит практически все необходимые инструменты для синтеза интерферограмм и их количественной обработки.

Для синтеза интерферограмм на рабочем столе ПК появится интерфейс программы обработки (рисунок 4).

Выбираем из памяти компьютера записанные поочередно две голограммы, загружаем их в соответствующие окна «голограмма 1» и «голограмма 2». Чтобы построить интерферограмму, нажимаем на кнопку «построить» в окне «интерферограмма». При этом появится окно «Выбор способа построения интерферограммы», позволяющее выбрать один из двух методов построения – метод двойного Фурье-преобразования (Фурье), либо метод 3-х пикселей (Threerix) – рисунок 5.

При использовании Фурье-метода, следующее окно будет называться «Выбор способа определения поля объекта», оно предназначено для выбора области, по которой проводится обратное Фурье-преобразование. Есть варианты выбора области для обратного Фурье-преобразования вручную с помощью мыши, либо выбрать ранее записанную маску, или выбрать последнюю записанную маску.

При выборе ручного ввода «определить мышью», откроется новое окно – рисунок 6.

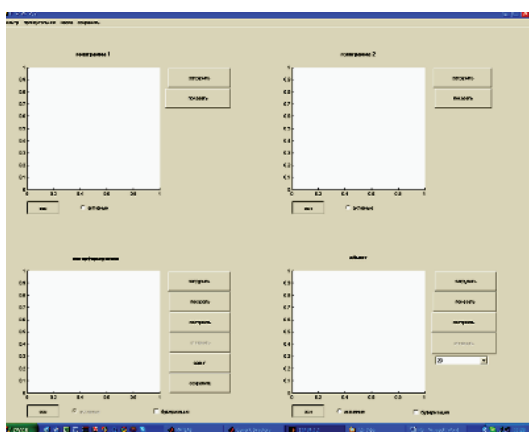


Рисунок 4 – Основное окно интерфейса программы обработки

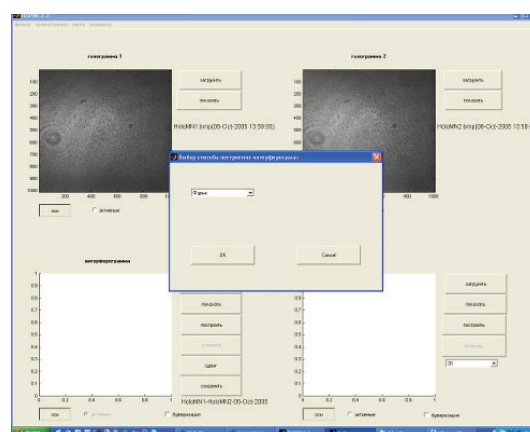


Рисунок 5 – Окно «Выбор способа построения интерферограммы»

Прямоугольники по обеим сторонам центрального максимума представляют собой Фурье-образы апертурной диафрагмы, установленной в объектном плече интерферометра, и характеризуют качество записи голограмм. При качественной записи эти изображения имеют высокую яркость и четкие границы.

После того, как мышью будет обрисована область в одном из двух изображений (показано на рисунке желтым цветом), по которой будет производиться обратное Фурье-преобразование, программа предложит на выбор сохранить или не сохранять данную. После завершения или отмены сохранения маски, в окне «интерферограмма» появится интерферограмма – рисунок 7.

В результате этого действия в окне «интерферограмма» появляется изображение интерферограммы, вырезанное по границам объекта.

Если интерферограмма оптимально отфильтрована и обрезана, то можно перейти к построению поля перемещений поверхности объекта, для чего следует нажать кнопку «построить» в окне «объект». Окно «объект» позволяет получить результат как в двумерном, так и в трехмерном виде.

В результате в нижнем правом окне («объект») появится картина поля относительных перемещений – рисунок 8.

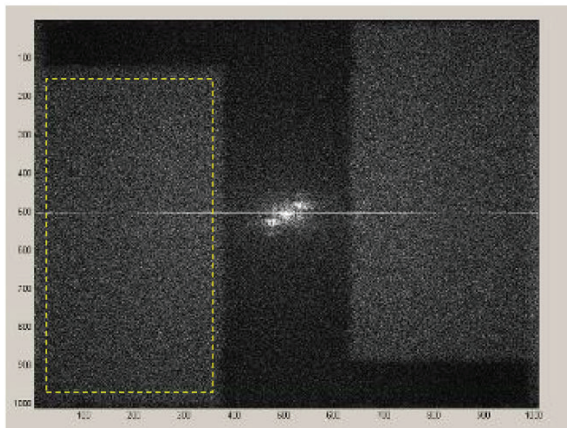


Рисунок 6 – Изображение Фурье-образа при ручном вводе

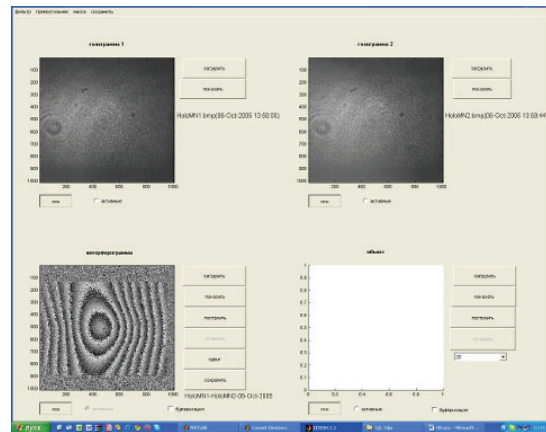


Рисунок 7 – Окно «интерферограмма»

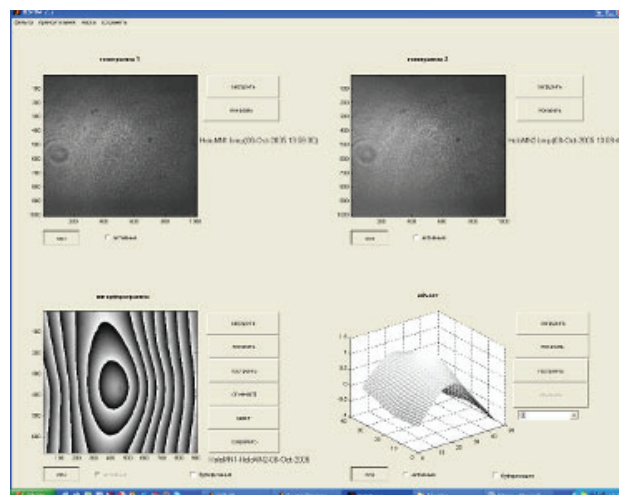


Рисунок 8 – Результат расчета поля абсолютных перемещений

**Выводы.** В результате исследования продемонстрировано преимущество применения метода цифровой голографической интерферометрии для восстановления комплексной амплитуды изображения Фурье-объекта с использованием голограмм сфокусированных изображений.

Оптическая схема регистрации голограмм сфокусированного изображения является наиболее технологичной с точки зрения применения голографии в качестве практической реализации в колебательном процессе, голографического неразрушающего контроля и технической диагностики, возможно также исследование объектов широкого размерного диапазона.

Цифровая запись серии голограмм и их последующая компьютерная обработка существенно расширяют диапазон проводимых измерений перемещений, колебаний и деформаций объекта с интерферометрической точностью, что важно при решении широкого спектра прикладных задач.

Поступила: 12.11.24; рецензирована: 26.11.24; принята: 28.11.24.

#### *Литература*

1. Goodman J.W. Digital image formation from electronically detected holograms / J.W. Goodman, R.W. Lawrence // Appl. Phys. Lett. 1967.
2. Kronrod R.W. Reconstruction of a hologram with a computer / R.W. Kronrod, N.S. Merzlyakov, L.P. Yaroslavskii // Sov. J. Tech. Phys. 1972. V. 17.
3. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику / Л.П. Ярославский. М.: Радио и связь, 1987.
4. Азаматов З.Т. КМОП и ПЗС матрицы в физических измерениях / З.Т. Азаматов, И.А. Рахматуллаев, Ш.И. Маматкулов, Ф.А. Керимов // II международная конференция «Оптика и фотоника – 2013»: материалы конф. Самарканд, 2013.
5. Pedrini G. Temporal phase unwrapping of digital hologram sequences / G. Pedrini, I. Alexeenko, W. Osten, H. J. Tiziani // Appl. Opt. 42. 2003.
6. Schnars U. Digital holography / U. Schnars, W. Jupter // Springer Verlag. 2005.
7. Горбатенко Б.Б. Оптические схемы и статистические характеристики сигнала спекл-интерферометров перемещений / Б.Б. Горбатенко, Д.В. Лякин, О.А. Перепелицына, В.П. Рябухо // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33. № 3.
8. Каленков Г. Цифровая корреляционная спекл-интерферометрия / Г. Каленков, А. Штанько // Фотоника. 2010. № 4.
9. Азаматов З.Т. Увеличение квантовой чувствительности в цифровой голографической интерферометрии / З.Т. Азаматов, И.В. Кулагин, В.И. Редкоречев, А.А. Жээнбеков // Тр. между. сем. «Оптика и Фотоника», Иссык-Куль, Кыргызстан, 2012.
10. Гуревич В.С. Цифровая голографическая интерферометрия как метод анализа деформаций и неразрушающих испытаний / В.С. Гуревич, В.Е. Гапонов, А.М. Исаев, В.И. Редкоречев // Тр. всерос. юбил. науч.-тех. конф. «Аэродинамика и прочность конструкций летательных аппаратов». Новосибирск, 2011.
11. Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory / H. Nyquist // Trans. AИШЕ. 1928. V. 47.
12. Азаматов З.Т. Методы и средства цифровой голографической интерферометрии для неразрушающего контроля и технической диагностики / З.Т. Азаматов, В.Е. Гапонов, А.А. Жээнбеков. Ташкент.: «Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi», 2021. 312 с.
13. Takeda M. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry / M. Takeda, Hideki, and S. Kobayashi // J. Opt. Soc. Am., 1982.
14. Kotel'nikov V.A. On the transmission capacity of 'ether' and wire in electric communications / V.A. Kotel'nikov // Successes of Physical Sciences. 2006. V. 49. № 7.